

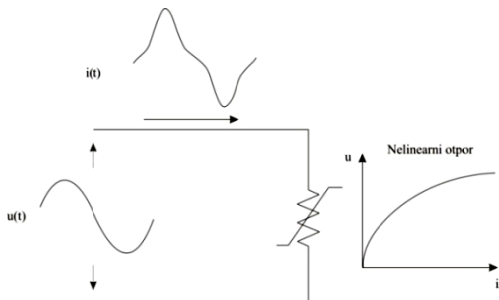
PRENOŠENJE VIŠIH HARMONIKA KROZ ENERGETSKE TRANSFORMATORE

Dunja Grujić, Željko Đurišić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - U ovom radu su analizirani viši harmonici, njihovo prenošenje kroz transformator i štetne posledice koje oni izazivaju. Pokazan je uticaj viših harmonika na povećanje svih gubitaka u transformatoru i na njegovo povećano zagrevanje. Kao rešenje ovih problema predstavljeni su specijalno dizajnirani transformatori prema $K - faktor$ u. Urađen je eksperiment u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, u kom je ispitivano prenošenje viših harmonika kroz transformatore sprega $YNyn$ i Dyn . Kao opterećenje su upotrebljene štedljive sijalice. One se masovno koriste, a iz mreže uzimaju struju čiji talasni oblik jako odstupa od prostoperiodičnog. Analizirani su talasni oblici struje primarnog i sekundarnog namotaja transformatora i upoređeni su njihovi harmonijski sastavi.

1. UVOD

Pojava harmonika u razvodnim mrežama uzrokovana je nelinearnim potrošačima, čija je karakteristika da im struja nije linearno proporcionalna naponu napajanja. Ako se idealni sinusni napon dovede na nelinearni otpor, koji ima nelinearni potrošač, struja napajanja će odgovarati $U - I$ karakteristici nelinearnog otpora, kao što je prikazano na slici 1. Vidljivo je da iako je oblik napona sinus, talasni oblik struje odstupa od sinusa.[1]



Slika 1. Izobličenje struje uzrokovano nelinearnim otporom

1.1. Izvori viših harmonika

Pojava viših harmonika i njihovi efekti na distributivnu mrežu usloveli su grupisanje svih potrošača u tri velike grupe, prema tome kako deluju na izobličenje mrežnog napona:

1. Prvu grupu potrošača čine aparati koji se primenjuju u domaćinstvu ili slični uređaji masovne primene. To su uređaji male snage, ali postoji velika verovatnoća istovremenog priključivanja većeg broja takvih uređaja na distributivnu mrežu (televizori, video - rekorderi, kompjuteri, klima uređaji, besprekidna napajanja, štedljive sijalice itd).

Još veći izvor harmonika su potrošači u poslovnim kancelarijama i tercijarni sektor. U ovakvim prostorijama obično ima značajno više aparata sa energetsom elektronikom, i više se vremena koriste. Sem toga upotreba čisto termičkih potrošača je ovde retka, te su često opisani aparati jedini potrošači u instalacijama.

2. Druga grupa potrošača se nalazi u okviru industrijskih pogona ili je direktno vezana za prenosnu mrežu. Kod ovih potrošača potrebno je voditi računa da se ne izobliče suviše

naponi i struje u distributivnoj mreži i da pojava viših harmonika napona u napojnom sistemu unutar pogona ne stvara probleme u radu instalisanih mašina i druge opreme.

3. Treću grupu potrošača čine energetske pretvarači velikih industrijskih postrojenja ili pretvarači koji se koriste u domenu prenosa električne energije (invertorsko-ispravljačke stanice prenosa jednosmernim naponom).

Kod industrijskih potrošača je dobro to što postoji veća mogućnost monitoringa jer su to veći potrošači i ima ih brojačano manje. Od njih se može zahtevati da ugrade filtre koji će smanjiti izobličenje napona. Za to su i oni sami često motivisani u svrhu podizanja kvaliteta električne energije koja im se isporučuje.[2]

1.2. Indeksi i veličine bitne za analizu viših harmonika

Svaka od sledećih veličina se može definisati i za struje i za napone:

1. Efektivna vrednost (RMS Value) - zagrevanje provodnika kroz koje protiče struja je određeno upravo efektivnom vrednošću struje. Definiše se kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1)$$

Ako signal sadrži više harmonike, efektivna vrednost se računa kao:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2 + I_{3RMS}^2 + \dots} \quad (2)$$

2. Vršni faktor (*Crest factor* - CF) - bitan je za određivanje dielektričnog stresa koji trpi materijal. Definiše se kao odnos vršne i efektivne vrednosti signala.

3. Harmonijski faktor (*Harmonic Factor* - HF) - definiše se za svaki harmonik posebno kao odnos efektivne vrednosti tog harmonika i efektivne vrednosti osnovnog harmonika.

4. Totalno harmonijsko izobličenje (*Total Harmonic Distortion* - THD) - predstavlja meru bliskosti stvarnog talasnog oblika signala i njegovog osnovnog harmonika. Računa se na sledeći način:

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (3)$$

1.3. Problemi koje stvaraju viši harmonici

Harmonici struja stvaraju probleme u napojnoj mreži kao i u instalacijama potrošača koji ih uzrokuje. Posledice i rešenja mogu biti veoma različita. Među najznačajnijim problemima do kojih može dovesti postojanje harmonika su: pregrevanje nultog provodnika, pregrevanje i povećanje gubitaka kod transformatora i električnih mašina, pojava rezonancije u mreži, nekontrolisano delovanje zaštitnih i upravljačkih uređaja, uticaj na telekomunikacione veze itd. Neke od metoda za ublažavanje i eliminisanje harmonika su: smanjenje intenziteta harmonijskih struja, ugradnja filtera, promena rezonantne frekvencije sistema.[3]

S obzirom na to da mreža ima određenu impedansu, harmonici struja uzrokuju harmonike napona u mreži, tj. harmonijske komponente padova napona. Što se više približava izvoru ova distorzija napona je sve slabija. Usled toga,

svi potrošači, koji se nalaze na istoj mreži na kojoj je i potrošač koji generiše harmonike, imaju deformisan napon i naravno i harmonike struja koji u njihovim instalacijama proizvode dodatne gubitke.

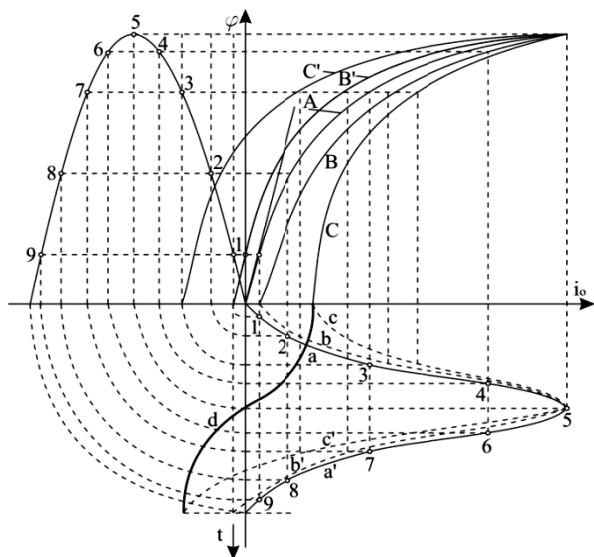
Gubici postoje iz dva razloga. Kao prvo, deformisana struja teče od izvora ka potrošaču i u svim linijama kroz koje prolazi proizvodi dodatne gubitke. Drugo, u svim bočnim granama (sa aspekta nelinearnog opterećenja) teku struje harmonika usled deformisanog napona čak i ako je opterećenje tih grana potpuno linearno. S obzirom na to može se reći da je potrošač koji proizvodi harmonike struja štetan ne samo za mrežu na koju je priključen već i za sve potrošače na istoj mreži. Jedno od rešenja je što je moguće više odvojiti linearna od nelinearnih opterećenja u zasebna strujna kola, to jest ne mešati linearna opterećenja sa nelinearnim.

2. TRANSFORMATOR - IZVOR VIŠIH HARMONIKA

2.1 Magnetske karakteristike limova

Limovi se karakterišu gubicima energije i krivom magnećenja, tj. magnetskom indukcijom u funkciji magneetskog polja ili magnetopubudne sile ili struje magnećenja. Gubici nastaju usled histerezisa i usled vihornih struja. Posmatrače se prvo idealni lim – bez gubitaka energije. Odnos $B=f(H)$ nije linearan, pa ni odnos $\varphi=f(i)$ nije linearan. Linearni odnosi bi važili isključivo u slučaju kada bi magnetsko kolo bilo sačinjeno od vazduha – tada se za kosinusni oblik napona dobija struja magnećenja i fluks koji su čiste sinusoidne (pri zanemarenoj aktivnoj otpornosti). Ako postoji gvožđe, za sinusoidalni fluks, struja magnećenja jako odstupa od sinusoidalnog oblika, i tim više što je jače zasićenje jezgra.

Na narednoj slici prikazano je konstruisanje krive magnećenja (ili idealnog praznog hoda) transformatora sa gvozdenim jezgrom. Sa A je označena kriva $\varphi=f(i_0)$ bez histerezisa. Na osnovu nje dobija se kriva struje a.



Slika 2. Formiranje talasnog oblika struje praznog hoda

Prvi korak ka modelovanju realnih uslova je uzimanje u obzir samo histerezisa pri vrlo sporim promenama (mala frekvencija). Tada kriva fluksa postaje dvoznačna – ima uzlaznu i silaznu krivu B i B', respektivno. Polazeći od ove krive, može se naći kriva struje b. Ova struja je, za razliku od struje a, nesimetrična. Asimetrija se javlja zbog toga što se pri porastu fluksa ide donjom, a pri smanjenju fluksa gornjom granom. Kao posledica toga, u struji b postoji aktivna ko-

ponenta struje koja pokriva gubitke aktivne snage u jezgrou (u ovom slučaju samo histerezisne gubitke). Ti gubici su srazmerni površini koju obuhvata histerezisna petlja BB'.

Ako se u obzir uzmu i gubici usled vihornih struja, histerezisna petlja postaće znatno šira - CC'. Ta petlja važi samo za jednu frekvenciju, jer gubici usled vihornih struja zavise od frekvencije. Na osnovu ove petlje, dobija se struja c, koja ima još izraženiju nesimetriju od struje b, jer su gubici sada veći, a time i aktivna komponenta struje.

Kriva d predstavlja ukupnu aktivnu komponentu struje. Može se приметiti da je ona približno kosinusnog oblika i da je u fazi sa naponom.

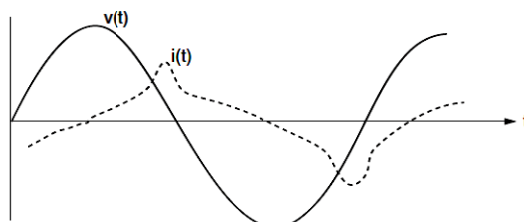
Analizom vremenskih oblika struje može se sledeće zaključiti:

1. da struja sadrži više harmonike, od kojih je najznačajniji treći,
2. maksimalna vrednost struja a, b i c je ista, jer njoj ne doprinosi ni aktivna komponenta struje, ni histerezis
3. viši harmonici malo utiču na efektivnu vrednost struje magnećenja.[4]

2.2 Određivanje struje praznog hoda

Struja praznog hoda i njene komponente mogu se izmeriti na već gotovom transformatoru. Potrebno je, međutim, ove struje računati već u fazi projektovanja, kako bi gotov transformator zadovoljio zadate uslove u pogledu gubitaka u gvožđu – što je vezano za vrednost aktivne komponente praznog hoda, a takođe i u pogledu reaktivne snage koja kviri faktor snage mreže – što je vezano za reaktivnu komponentu struje praznog hoda.

Dakle, pošto karakteristika magnetnog kola nije prava linija, induktivnost L_{μ} nije konstantna. S obzirom na to struja nema sinusoidalni oblik i njena vrednost nije srazmerna sa naponom. Takođe, u gvožđu postoje gubici energije koje mora pokriti mreža na koju je priključen transformator. Kao posledica toga, postoji aktivna komponenta struje praznog hoda, pa ona zaostaje manje od 90° za fazom napona, [4],[5]. Ove pojave su ilustrovane na slici 3.



Slika 3. Talasni oblici napona i struje[5]

3. UTICAJ HARMONIKA NA TRANSFORMATORE

U većini savremenih distributivnih mreža iznos viših harmonika struja je značajan u odnosu na osnovni harmonik. Viši harmonici struje dovode do povećanja gubitaka u gvožđu i namotajima distributivnih transformatora zbog povećanja nivoa rasutog fluksa, kao i do povećanja buke koju emituje transformator, zagrevanja provodnika, kućišta, držača, steznih zavrtanja itd. Sve to smanjuje efikasnost transformatora i ubrzava starenje izolacije usled dodatnog zagrevanja. Ovo dalje vodi do smanjenja vremenskog razmaka za zamenu transformatora koji se određuje na osnovu standarda IEC 354 – Uputstvo za opterećivanje uljnih energetskih transformatora.

Prema IEC 60076-7 posledice korišćenja nelinearnih opterećenja su sledeće:

1. temperatura namotaja, stezaljki, spojnih žica, izolacije i ulja raste i može dostići neprihvatljivi nivo
2. rasuta gustina fluksa van aktivnih delova se povećava, izaziva dodatna zagrevanja usled vrtložnih struja u metalnim delovima koje obuhvata fluks
3. kombinacija glavnog fluksa i uvećanog rasipanja i nulte komponente fluksa smanjuje efikasnost jezgra,
4. sa promenom temperature, menja se i sadržaj vlage i gasova u izolaciji i ulju
5. uvodni izolatori, priključne veze kablova i strujni transformatori biće izloženi većem opterećenju, koje prevazilazi njihove projektovane i radne granične vrednosti.

3.1 Povećanje gubitaka transformatora usled nelinearnog opterećenja

Uticiji viših harmonika struje na gubitke transformatora su sledeći:

1. Uticaj viših harmonika na dodatne gubitke u namotajima transformatora (P_{Cu}) - Efektivna vrednost struje opterećenja se povećava zbog sadržaja viših harmonika, tako da su sada gubici u bakru P_{Cu} dati izrazom:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{eff}^2 = R \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h,eff}^2 \quad (4)$$

2. Uticaj harmonika struje na gubitke usled vrtložnih struja u namotajima P_{EC} - Ove struje se javljaju u provodnicima transformatora usled curenja magnetnog fluksa. Ovi gubici su proporcionalni kvadratu struje opterećenja i kvadratu frekvencije. Upravo ova karakteristika može da izazove prevelike gubitke u namotajima i samim tim neprihvatljiv porast temperature namotaja transformatora. Pri proticanju struje koja, pored osnovnog ($h=1$), sadrži i više harmonike reda $h=2,3,\dots,h_{max}$, gubici P_{EC} su dati izrazom:

$$P_{EC} = P_{EC-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_{1n}} \right]^2 h^2 \quad (5)$$

gde su P_{EC-1n} - gubici usled vrtložnih struja pri nominalnoj struji (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

3. Uticaj harmonika struje na ostale gubitke usled rasipanja P_{SL} - Ostali gubici u transformatoru se pojavljuju zbog fluksa rasipanja koji predstavljaju gubitke u konstrukcijskim delovima transformatora kao što su kotao, priključne stezaljke, metalni držači... Ovi gubici će se povećati proporcionalno kvadratu struje opterećenja. Studije proizvođača i drugih istraživača pokazuju da gubici usled vrtložnih struja na glavnim mestima spajanja i strukturalnim delovima rastu sa harmonijskim eksponencijalnim faktorom od 0,8 ili manje. Ostali gubici usled rasipanja mogu se izračunati na sledeći način:

$$P_{SL} = P_{SL-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_{1n}} \right]^2 h^{0,8} \quad (6)$$

gde su P_{SL-1n} - gubici u sudu i konstrukcijskim delovima zbog polja rasipanja pri nominalnoj vrednosti struje (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

4. DC komponente struje opterećenja

Harmonične struje opterećenja su praćene DC komponentom. DC komponenta struje opterećenja će neznatno povećati gubitke u jezgru transformatora, ali će znatno povećati struju magnećenja i brujanje transformatora.[6]

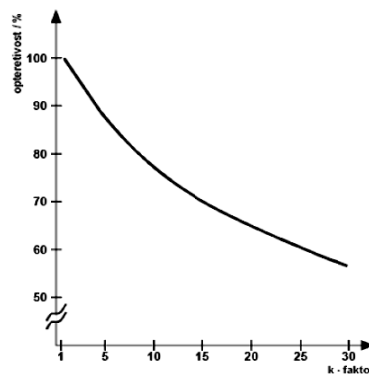
Gubici povećavaju temperaturu osnovnih delova, a za uljne transformatore to je temperatura ulja. Dakle, struje viših harmonika uzrokuju dodatna dielektrička, termička i mehanička naprezanja u elektroenergetskim mrežama, te dovode do

pojačanog zagrevanja transformatora i zasićenja jezgra. Dodatni termički gubici mogu uticati i na smanjenje životnog veka i na smanjenu opteretljivost transformatora značajno ispod nazivne snage.

3.2 K faktor

Izvođenje analize transformatora u harmonijskom okruženju zahteva poznavanje vrste opterećenja, sastav harmonika struje opterećenja i ukupne deformacije usled harmonika (THD). U skoro svim slučajevima potrebna su merenja kako bi se utvrdio problem na odgovarajućoj lokaciji analiziranjem struje opterećenja.

K - faktor je mera uticaja viših harmonijskih članova u struji opterećenja na transformator, a definisan je prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986. K - faktor definiše kako transformator podnosi dodatno zagrevanje (povećane gubitke) izazvano višim harmonicima u struji opterećenja. Na osnovu K - faktora se računa smanjenje raspoložive snage transformatora zbog dodatnih gubitaka, a pri dizajniranju novog transformatora, K - faktor se koristi za povećanje projektovane snage istog da bi transformator zadovoljio 100% opterećenja.



Slika 4. Zavisnost opteretljivosti transformatora u zavisnosti od K faktora

Ovi specijalni transformatori imaju specifičnosti u konstrukciji, koje omogućavaju smanjenje dodatnog zagrevanja usled viših harmonika, kao što su: magnetski štitovi, magnetski šantovi, povećanje klase izolacije, pojačanje neutralnog provodnika, upotreba elektrostatičkih uzemljenih štitova itd.

Transformatori projektovani prema određenom K - faktoru su približno dva puta skuplji i teži za oko 115 % od klasičnih transformatora. I pored toga, preporučuje se njihovo korišćenje kako bi se izbegle nepredviđene vruće tačke koje bi se javile kod klasičnih transformatora pri nesinusoidalnom opterećenju.[7],[8],[9]

4. SPREGE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Kod trofaznih transformatora moguća su, u osnovi, dva tehnička rešenja:

1. grupa od tri jednofazna transformatora, sa zasebnim magnetskim kolima
2. jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim kolom.

Vrste sprega su:

1. Trougao (oznaka D za VN, odnosno d za NN)

Ova sprega omogućava:

- da struje u faznim provodnicima namotaja budu $\sqrt{3}$ puta manje od struje u linijama. Ovo je bitno kod transformatora velikih snaga, naročito na nižim naponima.

- suzbijanje nulte komponente struje i viših harmonika čiji je red deljiv sa tri, ako se jave na strani uzemljene zvezde. Ako se nulta struja i harmonici deljivi sa tri jave na strani trougla ne mogu se u njemu zatvoriti te se ne prenose na drugu stranu transformatora. Elektromotorne sile trećeg harmonika u različitim fazama su međusobno u fazi. Zato ne mogu u namotaju trougla generisati struje.

Budući da su međufazni i fazni naponi jednaki, ova sprega, u odnosu na spregu zvezda, zahteva veći broj navojaka, manjeg preseka (radi 3 puta manje struje) uz veće učešće izolacije. Ovo ima za posledicu veću količinu bakra kod visokonaponskih transformatora.

2. zvezda (oznaka Y za VN, odnosno y za NN)

Ova sprega omogućava:

- uzemljenje neutralne tačke, što ograničava prenapone i smanjuje izolaciju koja je skupa na visokom naponu

- izvlačenje neutralnog provodnika u niskonaponskim mrežama, što omogućava priključak jednofaznih prijemnika na trofaznu mrežu

- Fazni napon je tri puta manji od međufaznog (priključenog) napona

3. slomljena zvezda (oznaka z)

Ova sprega omogućava:

- uzemljenje zvezdišta i izvlačenje neutralnog provodnika kao i kod sprege zvezda

- sprega Z je skuplja jer zahteva veći broj navojaka i komplikovaniji namotaj ali zato ima najmanju nultu impedansu od svih sprege. Zato je Z sprega pogodna za asimetrična opterećenja, kada se javlja nulta komponenta struje

Namotaj pojedine faze sačinjavaju dva redno povezana polunamotaja koji nisu na istom stubu. Ova sprega se isključivo primenjuje za NN namotaje. Razlog tome je to što je pri njenoj realizaciji, za dobijanje istog faznog napona kao i pri sprezi Y, potrebno $\sqrt{3}/2$ puta više navojaka, što zahteva oko 15.47% više bakra u odnosu na spregu Y. S obzirom na visoku cenu bakra ova osobina se javlja kao veliki nedostatak sprege Z. Međutim, njene izuzetno dobre osobine pri asimetričnim opterećenjima, čine je često korišćenom kod namota niskog napona trofaznih transformatora.[4],[10]

Da bi se izbeglo nepotrebno šarenilo u praksi se ne koriste sve moguće sprege trofaznih energetskih transformatora. Standardne sprege su date u sledećoj tabeli:

Tabela 1. Standardne sprege transformatora

Grupa sa sprežnim brojem	Standardna sprega
k = 0	Dd0, Yy0, Dz0
k = 6	Dd6, Yy6, Dz6 (retko se koriste)
k = 5	Dy5, Yd5, (Dz5 – retko se koristi)
k = 11	Dy11, Yd11, Yz11 (retko se koriste)

Izvor: Milenko Đurić, „Visokonaponska postrojenja“

5. EKSPERIMENTALNI DEO

Cilj ovog eksperimenta je utvrđivanje prenošenja viših harmonika kroz transformator. Korišćena aparatura je prikazana na slici 5. Eksperiment je izveden u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

U eksperimentu su korišćena tri monofazna transformatora. Kao opterećenje su upotrebljene štedljive sijalice.

Snimanje rezultata i analiziranje harmonijskog sastava signala vršeno je pomoću programa za proveru kvaliteta električne energije na bazi personalnog računara, koji je razvijen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.



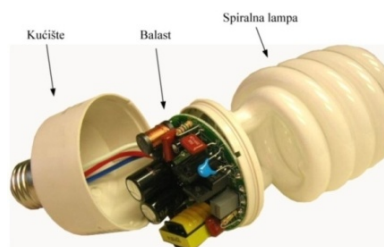
Slika 5. Aparatura korišćena u eksperimentu

5.1 Štedljive sijalice

Kompaktne fluorescentne lampe se prodaju kao zamena za sijalice sa užarenom niti. Postaju jako popularne zbog štedljivosti, pa se zato često i nazivaju štedljive sijalice (energy saving lamps). One se ubacuju u ležišta sijalica sa užarenom niti tako da se ne mora kupovati nova svetiljka, već se prosto iskoriste stare svetiljke sa novim izvorima.

Ove lampe u svom grlu sadrže minijaturni elektronski balast koji kontroliše rad 8mm – arske fluorescentne cevi. To su elektronski balasti za fluorescentne cevi koji navodno povećavaju efikasnost. U suštini oni su nešto malo efikasniji od boljih magnetnih balasta. Sem toga sa ovim balastima je nivo svetlosti lampi ujednačen tokom čitavog životnog veka putem kontrole veličine struje napajanja na principu povratne sprege, što dalje za posledicu ima smanjenje ukupne efikasnosti. Glavna mana ovih balasta je što proizvode harmonike struje. Doduše, postoje i modeli koji redukuju harmonike ali su skuplji i ne ugrađuju se u manje jedinice.

Štedljive sijalice imaju očekivani životni vek od 6000 sati. Ove lampe su postale odomaćene u hotelima i ugostiteljskim objektima, ali su sve češće i u domaćinstvima, pa se mogu očekivati veći problemi sa harmonicima u budućnosti upravo zbog ovih lampi.



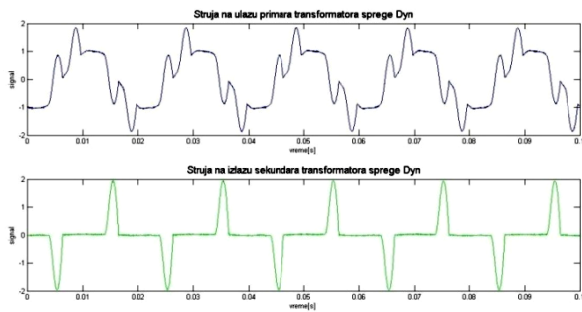
Slika 6. Elementi štedljive sijalice

5.2 Rezultati eksperimenta

5.2.1 Transformator sprege Dyn

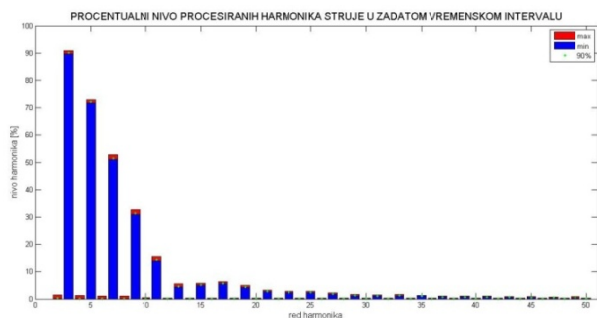
Prvo je ispitivano ponašanje transformatora sprege Dyn. Na sekundar transformatora, koji je spregut u uzemljenu zvezdu, priključeno je opterećenje od tri štedljive sijalice. One su izazvale izoblicenje struje na izlazu iz sekundara koje je prikazano na slici 7. Pošto je primar spregnut u trougao, u

njemu će se zadržati treći harmonik struje, tako da na ulazu u transformator postoji izobličena struja (data takođe na narednoj slici), ali sa znatno manjim trećim harmonikom. Na displeju su dobijeni sledeći talasni oblici:



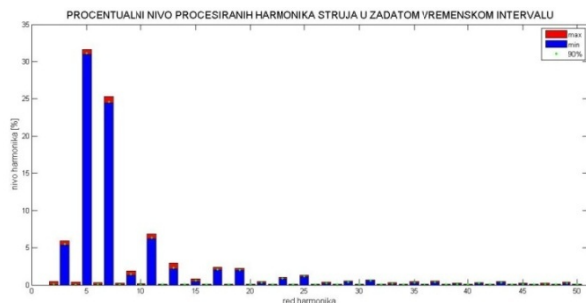
Slika 7. Talasni oblici struje na ulazu primara (gore) i na izlazu sekundara transformatora (dole)

Nakon izvršene harmonijske analize dobijenih talasnih oblika struje, na izlazu sekundara transformatora dobijen je dijagram na narednoj slici. Vrednosti viših harmonika su normalizovane u odnosu na vrednost osnovnog. Može se primetiti izuzetno visok treći harmonik, kao i peti, sedmi itd. Parnih harmonika, po pretpostavci, gotovo da nema. THD ovog signala je 79,803%, što je vrlo visoka vrednost.



Slika 8. Procentualno učešće pojedinih harmonika u izlaznoj struji sekundara transformatora Dyn sprege

Nakon izvršene harmonijske analize dobijenih talasnih oblika struje na ulazu primara transformatora dobijen je dijagram na narednoj slici. Može se primetiti znatno manji treći harmonik. THD ovog signala je 38,107%. Dakle ukupan sadržaj harmonika je znatno smanjen u odnosu na struju koja postoji na izlazu iz sekundara transformatora.

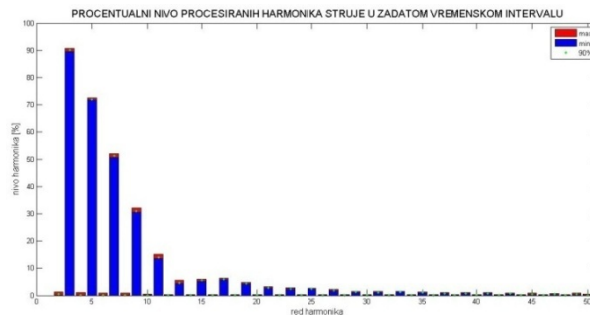


Slika 9. Procentualno učešće pojedinih harmonika u ulaznoj struji primara transformatora Dyn sprege

Uzrok ove pojave, smanjenja viših harmonika, je svakako veza primara u trougao. On sprečava dalji tok triplih harmonika (onih deljivih sa tri), tj. trougao za jednovremene struje predstavlja praktično kratak spoj. Takođe, može se zanemariti i uticaj grane magnećenja, kao kod ogleđa kratkog spoja. Mala vrednost trećeg harmonika u ulaznoj struji

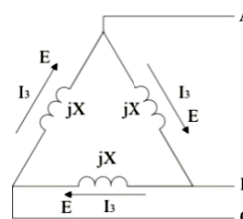
primara transformatora je posledica nesavršene simetrije opterećenja transformatora na kojem je vršen eksperiment.

Nakon izvršene harmonijske analize struje u trouglu primara transformatora dobijen je dijagram na narednoj slici. Može se primetiti znatno viši sadržaj harmonika nego u struji na ulazu u primar transformatora.



Slika 10. Procentualno učešće pojedinih harmonika u primarnom namotaju transformatora Dyn sprege (struja u trouglu)

Na narednoj slici je prikazana sprega u trougao:



Slika 11. Sprega u trougao

I_3 je treći harmonik struje koja teče kroz namotaj, jX je reaktansa namotaja, a E je indukovana elektromotorna sila u tom namotaju. Struja trećeg harmonika se može izračunati na sledeći način:

$$I_3 = \frac{E}{jX} \quad (7)$$

Napon U_{AB} je:

$$U_{AB} = jXI_3 - E \quad (8)$$

Dalje važi:

$$U_{AB} = jX \frac{E}{jX} - E = 0 \quad (9)$$

Ovim je pokazano da trougao predstavlja praktično kratak spoj za sve jednovremene struje, pa s obzirom na to i za treći harmonik. Međutim, usled realnog opterećenja ne postoji savršena simetrija opterećenja svake faze. Zbog toga, tripli harmonici nisu jednovremeni i jedan njihov deo će ipak izaći iz trougla, i preneti se u mrežu, kao u pokazanom eksperimentu. Ipak, deo trećeg harmonika struje, koja izađe iz trougla, je mnogo manji od onog koji se zadrži u trouglu.

5.2.2 Upotreba sprege u trougao

Sekundarni namotaj blok transformatora se uvek spreže u trougao iz dva razloga:

1. da se smanji struja sekundarnog namotaja, jer su snage generatora velike

2. da se spreči transformacija trećeg harmonika napona generatora u VN mrežu. Naponi generatora nisu idealno sinusoidalni, već sadrže određeni procenat trećeg harmonika.

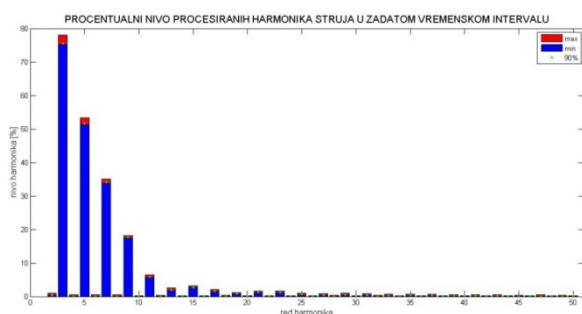
Standardna sprega koja se koristi za blok transformatora je YNd5. Ovakvi transformatori se koriste i za distributivne transformatore tipa 110kV/XkV, gde je $X=10, 20$ ili $35kV$.

Kao distributivni energetski transformatori tipa XkV/0,4kV, gde je X=10, 20 ili 35kV, standardno se koriste transformatori sprege Dyn5. Koriste se kako bi se sprečio prolaz trećeg harmonika struje, kog daju nelinearni potrošači, u mrežu. Sprega Dzn5 se koristi kada se u niskonaponskoj mreži očekuje veliko asimetrično opterećenje.[4],[10]

5.2.3 Transformator sprege YNyn

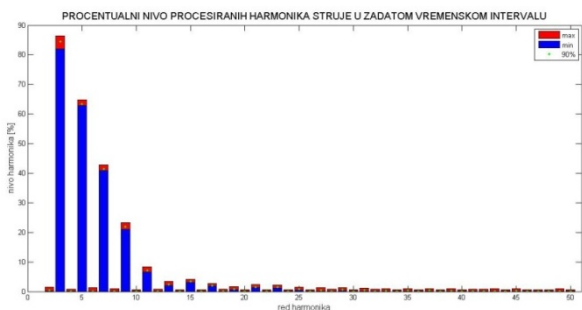
Naredno ispitivanje prenošenja viših harmonika kroz transformator vršeno je na transformatoru sprege YNyn. Ponovo su kao opterećenje korišćene tri štedljive sijalice. S obzirom na spregu transformatora, očekivano je da se čitava struja, sa svim svojim višim harmonicima prenese kroz transformator.

Nakon izvršene harmonijske analize dobijenih talasnih oblika struje na ulazu primara transformatora dobijen je dijagram na narednoj slici. THD ovog signala je 70,86%.



Slika 12. Procentualno učešće pojedinih harmonika u ulaznoj struji primara transformatora YNyn sprege

Nakon izvršene harmonijske analize dobijenih talasnih oblika struje na izlazu sekundara transformatora dobijen je dijagram na narednoj slici. THD ovog signala je 76,0215%.



Slika 13. Procentualno učešće pojedinih harmonika u izlaznoj struji sekundara transformatora YNyn sprege

Može se primetiti neznatna razlika između harmonijskog sastava ove dve struje. O tome svedoči i razlika u njihovom ukupnom harmonijskom izobličenju. Ova razlika postoji zbog struje magnećenja. Ona unosi dodatno izobličenje u signal struje, naročito treći harmonik, što se može primetiti i na predhodnim dijagramima. Ovaj efekat se obično može zanemariti. U ovom eksperimentu je korišćen mali transformator, sa malim opterećenjem, pa se ova pojava mogla snimiti.

Struja magnećenja i njene komponente detaljno su obrađene u poglavlju 2.

6. ZAKLJUČAK

Sve veće prisustvo nelinearnih potrošača u distributivnoj mreži aktualizuje problem viših harmonika struja i napona. U ovom radu je analiziran uticaj viših harmonika na energetske transformatore. Analizirani su efekti i mere uticaja viših harmonika struja i napona na energetske transformatore. Na

kraju rada su prikazani rezultati eksperimenta u kojem su analizirani i kvantitativno prezentovani efekti prenošenja viših harmonika struje kroz transformator pri različitim spregama primarnog i sekundarnog namota. Eksperimenti su pokazali da se izborom sprege transformatora može značajno uticati na propagaciju viših harmonika struja u EES. Cena tog efekta su dodatni gubici u transformatoru.

7. LITERATURA

- [1] L. Wagmann, S. Žutobradić, „Stohastička analiza harmonika na gradskim ts 10(20)/0,4 kV“, 1. savetovanje HO CIRED, Šibenik, 18 - 21. maj 2008, R. SO2 – 17.
- [2] Ž. Janda, „Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama“, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, 2004.
- [3] Dž. Sinanović, A. Jahić, A. Botalić, „Analiza viših harmonika opterećenja PC-a sprega transformatora DYg“, List Saveza energetičara „Energija/Ekonomija/Ekologija“, Broj 1 / Godina XII / Mart 2010, „Akademska izdanja“, Beograd, 2010.
- [4] Đ. Kalić i R. Radosavljević, „Transformatori“, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2001.
- [5] A. Cusco and M. Thompson, „Power Quality in Electrical Systems“, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007.
- [6] D. Cvijić i P. Matic, „Analiza uticaja nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore“, XII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2013, R. ENS - 1 – 8
- [7] C. Sankaran, „Power Quality“, CRC Press LLC, Florida, 2002.
- [8] R. Berglund, „Frequency Dependence of Transformer Losses“, Master of Science Thesis in the Programme Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Goteborg, Sweden, December 2009.
- [9] S. Hutter, „Praćenje opterećenja distribucijskih transformatora“, 2.(8.) savetovanje HO CIRED, Umag, 16. – 19. svibnja 2010., R. SO1 – 21.
- [10] M. Đurić, „Visokonaponska postrojenja“, Beopres štampa, Beograd, 2009.

Abstract - This paper analyzes higher harmonics components of current, their transfer through power transformers and the negative effects they cause. The influence of higher harmonics increases the losses and heating. As a solution for these problems, this paper represents specially designed transformers with K – factor. One experiment, performed in the laboratory of Electrical Engineering in Belgrade, investigated transmission of harmonics through transformer connections YNyn and Dyn. Energy saving light bulbs were used as the load. Waveforms of current at the primary and secondary side of transformers and current harmonic content at primary and secondary side of the transformer were recorded in the experiment.

TRANSMISSION OF HIGHER HARMONICS THROUGH POWER TRANSFORMERS

Dunja Grujić, Željko Đurišić